

种还分离模式下玉米秸秆还田对土壤磷有效性及其有机磷形态的影响

赵小军, 李志洪, 刘龙, 崔婷婷

(吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 采用尼龙网袋法对种还分离模式下的玉米秸秆还田进行田间原位模拟, 比较不同秸秆还田量在不同还田深度下对土壤全磷、速效磷和不同形态有机磷的影响。试验设置4个水平秸秆添加比例 R0(0%)、R1(0.44%)、R2(0.88%)、R3(1.32%)和3个不同还田深度 0—15、15—30、30—45 cm 交叉处理。结果表明, 秸秆还田1 a后, 各土层中土壤全磷含量随秸秆还田量的增加均无显著改变; 在0—15 cm 土层中, 与R0相比, R1、R2、R3处理下的土壤速效磷分别增加了27.0%、49.3%、64.1%, 在15—30 cm 和30—45 cm 土层速效磷随着秸秆还田量的增加也呈显著增加, 增加量大小依次为0—15 cm > 15—30 cm > 30—45 cm; 有机磷组分在0—15 cm 土层中表现为, 相比于R0、R1、R2、R3处理的活性有机磷和高稳定性有机磷含量无显著差异, 中等活性有机磷分别减少了12.8%、26.2%、36.3%, 中稳定性有机磷分别增加了25.1%、53.5%、61.6%, 15—30 cm 和30—45 cm 土层各有机磷组分含量变化也均表现为随着秸秆还田量的增加, 中等活性有机磷含量升高, 中稳定性有机磷含量降低, 活性有机磷和高稳定性有机磷无显著差异。研究表明, 种还分离模式下的玉米秸秆还田主要通过促进土壤其它形态的磷转化为速效磷而增加土壤速效磷含量, 为下季作物提供可以直接吸收利用的磷源, 同时提高了土壤中稳定性有机磷的含量, 降低了中等活性有机磷的含量。

关键词: 玉米秸秆; 种还分离; 磷

中图分类号: S151.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)01-0243-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.01.040

Effects of Maize Straw Returning on Soil Phosphorus Availability and Organic Phosphorus Forms Under the Mode of Planting and Returning

ZHAO Xiaojun, LI Zhihong, LIU Long, CUI Tingting

(College of Resources and Environment of Jilin Agricultural University, Changchun 130118)

Abstract: In situ simulation was performed on the corn stalks under the mode of planting and returning by nylon bag method. The experiment was conducted to compare the effects of different amounts of straw returning to field on soil total phosphorus, available phosphorus and different forms of organic phosphate. In the experiment, four levels of R0 (0%), R1 (0.44%), R2 (0.88%), R3 (1.32%) and three different returning depths of 0—15 cm, 15—30 cm and 30—45 cm were carried out. The results showed that the soil total phosphorus content did not change significantly with the increase of the amount of straw returning to field after 1 year. Compared with R0, the soil available phosphorus in R1, R2 and R3 increased by 27.0%, 49.3% and 64.1% respectively in 0—15 cm soil layer. The available phosphorus in 15—30 cm and 30—45 cm soil layers also showed a significant increase with increasing amount of straw returning to soil, and the increasing amount followed by the trend: 0—15 cm > 15—30 cm > 30—45 cm. Compared with R0, the contents of active organic phosphorus and high-stable organic phosphorus of R1, R2 and R3 in 0—15 cm soil layer showed no significant difference, and the middle active organic phosphorus decreased by 12.8%, 26.2% and 36.3% respectively, and the content of stable organic phosphorus increased by 25.1%, 53.5% and 61.6%. In 15—30 cm and 30—45 cm soil layers, soil moderate organic phosphorus increased respectively with the amount of straw returning and the content of moderate active organic phosphorus increased and the content of moderate stable organic phosphorus decreased, while there was no significant difference between active organic phosphorus and high stable organic phosphorus. The results showed that maize straw returning to field could

收稿日期: 2016-09-23

资助项目: 吉林省科技厅重点项目(LFGC14213); 科技部丰粮工程项目(2012BAD04B02)

第一作者: 赵小军(1992—), 男, 山西忻州人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机培肥研究。E-mail: 632836844@qq.com

通信作者: 李志洪(1957—), 博士, 教授, 博导, 主要从事土壤培肥、土壤—作物养分高效利用、农业信息技术与精准农业研究。E-mail: lizhihong21@163.com

increase the content of available phosphorus in soil by promoting the conversion of phosphorus from other forms of soil to available phosphorus. Maize straw returning could supply phosphorus source for direct use in the next season. Meanwhile, it could improve the moderate stability organic phosphorus content and reduce the moderate active organic phosphorus content in the soil.

Keywords: maize straw; planting and returning; phosphorus

秸秆还田作为一种作物秸秆的合理的利用方式,已经成为了国内外研究的一个重要课题,秸秆还田可以有效减少由于秸秆焚烧处理带来的环境问题和生物资源浪费,并且有利于土壤肥力增加和土壤生态系统的可持续发展^[1]。已有的研究已经表明,磷作为植物生长发育所必需的一种大量元素,是制约作物生长和产量的重要因素^[2],一般情况下,虽然植物可以吸收某些有机磷化合物促进生长,但是植物主要吸收的还是可溶性无机磷^[3](即速效磷),而活性有机磷、中等活性有机磷和中稳定性有机磷直接影响着土壤速效磷的含量^[4]。活性有机磷是有机磷组分中最容易矿化且最容易被作物吸收利用的部分,中等活性有机磷相对比较容易矿化而被植物利用,中稳定性有机磷则较难矿化,其主要成分是富里酸磷,高稳定性有机磷主要是指胡敏酸磷,是有机磷组分中最难被作物吸收利用的部分。多年来关于秸秆还田的研究表明,长期秸秆还田能够显著增加土壤全磷以及速效磷含量^[5-6],同时秸秆还田能够影响不同磷素形态之间的转化^[7]。然而,常规的秸秆还田通常不利于当季作物生长,容易造成当季作物减产^[8]。

本研究采用三垄两行耕作制度与秸秆还田相结合,玉米种植与秸秆还田分离,形成种还分离模式^[9],即每 3 垄分为玉米种植区和秸秆还田区 2 个部分,下

一季将秸秆还田区和种植区的位置进行交换,以此循环往复的进行。种还分离模式既保留了三垄两行在耕作制度上的优势,又将秸秆全量还田培肥土壤的作用得以实现,基本消除了秸秆全量还田对当季玉米生长的不利影响。种还分离模式下的还田区秸秆还田量相当于常规还田量的 2 倍,秸秆腐解转化 1 a 后再进行深翻,20 cm 以下的犁底层坚实,土壤基础肥力不高,深层秸秆还田对于提高深层土壤肥力,恢复土壤养分具有重要的实践意义。本文通过尼龙网袋法进行田间原位模拟,研究不同量的秸秆还田对不同深度土壤磷及其形态的影响,从土壤磷转化和有效磷的恢复等方面探讨种还分离模式的可行性并为之提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验在梨树县泉眼沟中国农业大学实验站进行,位于吉林省四平市,该地区属于北温带大陆性季风气候,四季分明,年均气温 4.8 ℃,年均降水量 617 mm。供试土壤为黑土,土壤的基本性质见表 1。田间作物为玉米(郑单 958),施用 NPK 复合肥(N 200 kg/hm², P₂O₅ 90 kg/hm², K₂O 80 kg/hm²),试验所用秸秆为上季玉米秸秆,基本理化性状为:有机碳 437.6 g/kg,全氮 8.29 g/kg,全磷 1.18 g/kg,全钾 12.22 g/kg。

表 1 供试黑土基本理化性质

土层深度/ cm	pH	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	全磷/ (g · kg ⁻¹)	有机质/ (g · kg ⁻¹)
0—15	5.52	128.3	61.6	172.9	0.91	28.3
15—30	5.95	82.6	20.7	108.7	0.59	19.9
30—45	6.54	58.3	13.2	71.8	0.44	12.5

1.2 试验设计

采用尼龙网袋田间原位填埋的方法,以不同秸秆还田量和不同还田深度设置交叉处理。秸秆添加比例以田间单位面积秸秆产量(10 000 kg/hm²)还到同样单位面积的土壤为常规还田全量,共设置秸秆未还田 0%(R0)、常规还田全量 0.44%(R1)、种还分离全量 0.88%(R2)和常规还田 3 倍量 1.32%(R3)4 个水平;还田深度从土壤耕作层到心土层共 45 cm,设置 3 个处理 0—15,15—30,30—45 cm。每袋装土 4 kg,所用秸秆均以尿素调节碳氮比为 25 : 1,于 2015 年玉米播种后分别填埋于相应土层,共计 12 个处理,每个处理设 3 次重复。于 2016 年玉米播种前挖出尼龙网袋采集土样。

1.3 测定项目及方法

将尼龙网袋中取出的土样中的秸秆和其他杂质除去,风干后过 1 mm 筛。土壤氮、磷、钾采用常规方法进行分析^[10],碱解氮采用碱解扩散法,速效钾采用乙酸铵提取法,全磷的测定采用酸熔钼锑抗比色法,速效磷测定采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 法,土壤 pH 采用 pH S—3C 型 pH 计测定,有机质测定采用重铬酸钾容量(外加热)法^[10],有机磷分级采用 Bowman-Cole 法^[11],将有机磷分为活性有机磷、中等活性有机磷、中稳定性有机磷和高稳定性有机磷。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 和 DPS 7.05 软件进行数据处理,采用 LSD(最小显著差异法)进行多重比较($p < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田对土壤全磷的影响

秸秆还田各处理的土壤全磷含量变化见表 2。土壤全磷整体表现为随着土壤深度的增加而逐渐降低,相比于对照 R0,在 0—15 cm 土层中,R1、R2、R3 处理的土壤全磷分别增加了 0.07%,0.29%,0.89%,但差异不显著,同时 15—30 cm 和 30—45 cm 土层土壤全

磷含量也无显著差异。原因可能有两个方面:其一,相比于土壤全磷玉米秸秆本身含磷量有限,本试验 4 个水平的秸秆添加量,理论计算秸秆全磷含量分别为 0.5、2.10、4.15、6 mg/kg;其二,秸秆还田 1 a 后,秸秆并没有全部腐解,其腐解率为 60%左右^[9],4 个水平秸秆还田当季能够提供土壤全磷的理论值约为 0.3、1.6、2.9、3 mg/kg。

表 2 不同量秸秆还田处理下土壤全磷含量 单位:mg/kg

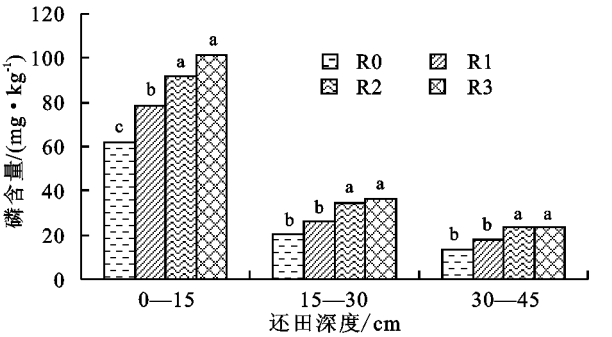
土层深度/cm	R0	R1	R2	R3
0—15	911.9±25.7a	912.6±28.6a	914.6±18.6a	920.0±15.4a
15—30	585.4±21.7a	587.4±15.4a	590.8±12.2a	586.8±24.5a
30—45	440.8±17.2a	442.8±22.4a	444.1±16.1a	441.4±14.2a

注:同列数据后不同小写字母表示 LSD(最小显著差法)在 $p<0.05$ 水平上差异显著。

2.2 秸秆还田对土壤速效磷的影响

秸秆还田对土壤速效磷的影响见图 1。在 0—15 cm 土层中,与对照 R0 相比,3 个不同还田量处理 R1、R2、R3 的土壤速效磷分别增加了 27.0%,49.3%,64.1%,R2 和 R3 处理相比于 R1 分别高出了 17.6%和 29.3%。而在 15—30 cm 和 30—45 cm 土层中,秸秆还田处理同样表现为土壤速效磷增加,但相比于对照 R0,R2 和 R3 处理的土壤速效磷增加有显著性差异,R1 处理差异不显著,同时,与 0—15 cm 土层相同的是,R2 和 R3 处理下土壤速效磷的含量显著高于 R1 处理,但 R2 与 R3 之间无显著性差异。从土壤速效磷的增加量来看,主要表现为不同秸秆还田量处理下,0—15 cm 土层要高于 15—30 cm 和 30—45 cm 土层。

秸秆还田后,一方面秸秆本身含有一定数量的磷,随着秸秆的腐解,一些易于分解释放的磷进入土壤中,直接提高了土壤速效磷的含量;另一方面,秸秆腐解过程中产生的一些有机阴离子、有机酸和腐殖质能够减少土壤对磷的吸附固定以及通过一些络合反应释放出难溶性磷酸盐中的磷^[12-13],同时秸秆还田能够促进土壤微生物的大量繁殖,提高土壤的生物活性^[14],从而增加了土壤速效磷。根据试验所用玉米秸秆的全磷含量可知,在 0—15 cm 土层中,与对照组 R0 相比,R1、R2 和 R3 处理理论上秸秆能够提供的全磷量分别占土壤速效磷增加量的 18.7%,20.4%,23.5%,在 15—30 cm 和 30—45 cm 土层中,R1、R2、R3 处理秸秆提供的全磷量分别占土壤速效磷的增加量的 56.4%,45.6%,59.6%和 68.9%,60.2%,88.5%。已有研究表明,秸秆在土壤中的腐解速率随着土壤深度的增加而降低^[15],因此深层土壤中秸秆提供的全磷量在一定程度上难以达到理论值。综合分析可知,种还分离模式下玉米秸秆还田对于土壤速效磷的增加主要是通过促进其他形态的磷转化为速效磷的方式,而且这种作用随着土壤深度的增加而降低,在 0—15 cm 土层表现最为显著。



注:同组数据顶端不同小写字母表示 LSD(最小显著差法)在 $p<0.05$ 水平上差异显著。下同。

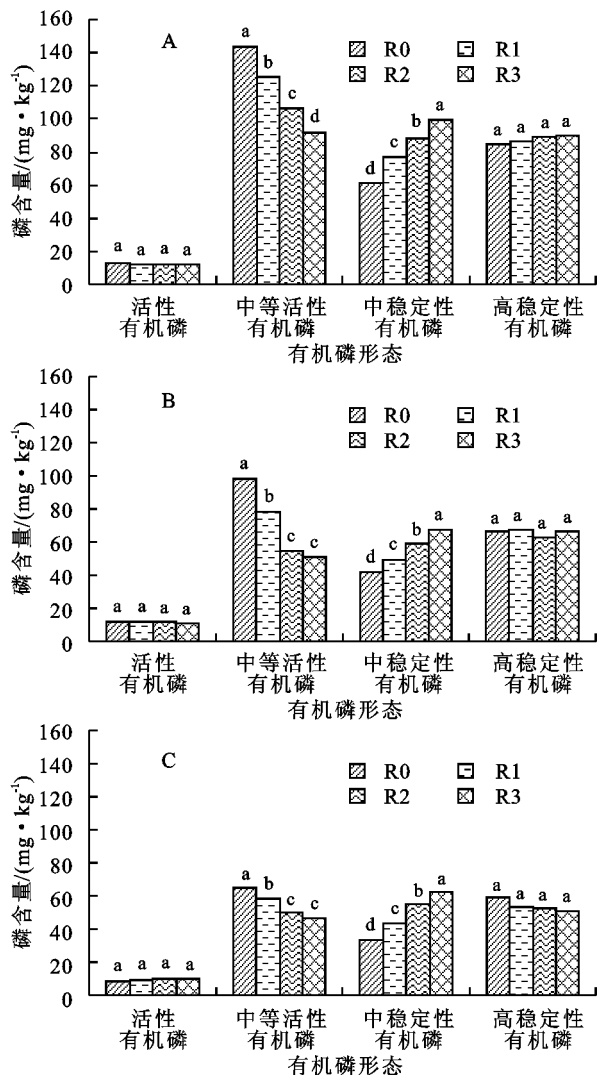
图 1 不同量秸秆还田处理下不同深度土壤速效磷含量变化

2.3 秸秆还田对土壤不同形态有机磷的影响

不同秸秆还田量处理下不同形态有机磷含量变化见图 2A、图 2B、图 2C。土壤不同形态有机磷含量整体均随土层深度的增加而逐渐减少,但在不同量的秸秆还田处理下有机磷变化不尽相同。在 0—15 cm 土层中,随着秸秆还田量的增加,活性有机磷无明显变化,中等活性有机磷逐渐减少,中稳定性有机磷逐渐增加,高稳定性有机磷呈增加趋势但差异不显著,与 R0 相比,R1、R2 和 R3 处理的中等活性有机磷分别减少了 12.8%,26.2%,36.3%,中稳定性有机磷分别增加了 25.1%,53.5%,61.6%。在 15—30 cm 土层中,相比于 R0,随着秸秆还田量的增加,活性有机磷与高稳定性有机磷含量变化均无显著差异,R1、R2 和 R3 处理的中等活性有机磷含量分别降低了 20.4%,44.9%,48.0%;中稳定性有机磷含量分别升高了 18.3%,42.0%,61.5%。在 30—45 cm 土层中,与 R0 相比,R1、R2 和 R3 处理的活性有机磷整体呈增加趋势但无显著性差异,中等活性有机磷的减少量分别为 10.6%,22.8%,28.2%;中稳定性有机磷的增加量分别为 30.3%,65.4%,88.1%;高稳定性有机磷呈现一定程度的减少但无显著性差异。

研究表明,种还分离模式下的秸秆还田主要影响土壤中等活性有机磷和中稳定性有机磷,秸秆还田使中等

活性有机磷含量降低,中稳定性有机磷含量增加,而对于活性有机磷和高稳定性有机磷则无明显影响。



注:图 A、B、C 分别表示 0—15,15—30,30—45 cm 土层。

图 2 不同土层中不同秸秆还田量处理下
不同形态有机磷含量变化

3 讨论

孙星等^[16]研究表明,长期的秸秆还田能够显著增加土壤全磷和速效磷的含量,但短期的秸秆还田对于土壤全磷的影响则并不显著。本试验的结果显示,种还分离模式下秸秆还田处理 1 a 后,3 个不同深度的土壤全磷含量均无显著差异,而不同深度土壤的速效磷含量均随着秸秆还田量的增加而增加,增加幅度随着土壤深度的增加而降低,土壤速效磷的增加主要是由于秸秆还田促进了其他形态的磷转化而来,转化的磷量与秸秆还田量成正比,与土壤深度成反比。黄欣欣等^[17]通过对冬小麦—夏玉米轮作中长期不同氮磷用量下秸秆还田对土壤磷素影响的研究表明,土壤磷素盈余和亏缺量与土壤中各磷形态含量均呈显著正相关,当土壤输入磷量低于作物输出磷量时,无论秸秆还田与否,土壤各形态磷均无显著变化;当土壤输入磷量

高于作物输出磷量时,随秸秆用量的增加土壤全磷、Olsen-P 和无机磷中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 均显著增加,其中以 Olsen-P 增幅最大。本试验采用田间原位模拟的方法,尼龙网袋全部埋于秸秆还田区,该区域当季仅进行秸秆还田无作物种植,土壤输入磷量高于作物输出磷量,与这一研究结果相符。种还分离模式下秸秆还田对于土壤速效磷含量的提高能够为下季作物提供可以直接吸收利用的磷源,特别是深层土壤速效磷恢复为下季作物提供了可利用的磷库。

本试验中不同形态有机磷的数据表明,种还分离模式下的秸秆还田 1 a 后能够显著增加土壤中稳定性有机磷的含量,减少土壤中的中等活性有机磷。马艳梅^[7]通过对长期定点下不同施肥处理对磷素形态转化的研究表明,秸秆还田后,土壤有机磷主要向中稳定性有机磷、高稳定性有机磷转化,而有利于活性较强的有机磷组分的积累,这与本试验研究结果一致。战厚强等^[18]通过室内模拟试验和小区试验对水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及土壤速效磷含量的影响研究表明,秸秆还田处理的土壤酸性磷酸酶活性普遍高于秸秆不还田处理,同时随着秸秆施入量的增加土壤磷酸酶活性提高。土壤有机磷可以在土壤微生物和土壤酶的共同作用下进行矿化而分解为无机磷,进而被植物吸收利用,其矿化速率取决于微生物的活动和磷酸酶的活性,通常情况下,土壤有机磷的年矿化率为 2%~4% 之间,秸秆还田能够提高土壤微生物数量和土壤磷酸酶的活性,从而提高了有机磷的矿化率。陈欣^[4]在黑土上采用秸秆、猪粪等进行不同种类有机肥对黑土有机磷各组分相对含量的研究表明,秸秆还田的同时,除了土壤中的活性有机磷能被直接被作物吸收利用外,黑土中的中等活性有机磷和中稳定性有机磷是补充土壤中有效磷含量的主要来源。综合数据分析,种还分离模式下的秸秆还田能够减少土壤中等活性有机磷,其原因一方面可能是秸秆还田对土壤有机磷矿化为无机磷有一定的促进作用,且以中等活性有机磷的矿化为主,另一方面可能是秸秆还田促进了中等活性有机磷向中稳定性有机磷方向转化;同时种还分离模式下的秸秆还田提高了中稳定性有机磷含量,这可能更有利于土壤有机磷的积累。

4 结论

(1)种还分离模式下的玉米秸秆还田 1 a 后土壤各土层中速效磷含量显著增加,增加量与秸秆还田量成正比,并且主要通过促进土壤其它形态的磷转化为速效磷而增加土壤磷素有效性,表现最显著的 0—15 cm 土层中,与对照 R0 相比,R1、R2 和 R3 处理的速效磷分别增加了 27.0%,49.3%,64.1%,速效磷增加量中秸秆理论提供全磷量占百分比分别为 18.7%,20.4%,23.5%。

(2)种还分离模式下的玉米秸秆还田 1 a 后,0—15 cm 土层中,R1、R2 和 R3 处理中等活性有机磷与对照 R0 相比分别减少了 12.8%,26.2%,36.3%;中稳定性有机磷分别增加了 25.1%,53.5%,61.6%;15—30 cm 和 30—45 cm 土层也均表现为随着秸秆还田量的增加中等活性有机磷显著减少,中稳定性有机磷显著增加,活性有机磷和高稳定性有机磷在各土层中均无显著差异。

参考文献:

- [1] 李彩虹,张勇,袁汉民,等. 秸秆还田对土壤碳、氮、磷含量的影响[J]. 宁夏农林科技, 2016, 57(2): 12-15.
- [2] Vu D T, Tang C, Armstrong R D. Changes and availability of P fractions following 65 years of P application to a calcareous soil in a Mediterranean climate[J]. Plant and Soil, 2008, 304(1/2): 21-33.
- [3] McDowell R W, Condon L M, Stewart I. An examination of potential extraction methods to assess plant-available organic phosphorus in soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 2008, 44(5): 707-715.
- [4] 陈欣. 长期施用有机肥对黑土磷素形态及有效性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
- [5] 慕平, 张恩和, 王汉宁, 等. 连续多年秸秆还田对玉米耕层土壤理化性状及微生物量的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 81-85.
- [6] Cheng Y, Hu H X, Di Y F, et al. Effects of straw returning to fields on soils and current status in anhui province[J]. Agricultural Science & Technology, 2013, 14(5): 776-779.
- [7] 马艳梅. 长期定点施肥对白浆土磷素形态转化的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2006, 18(2): 39-41.
- [8] 冀保毅. 深耕与秸秆还田的土壤改良效果及其作物增产效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2013.
- [9] 矫丽娜. 深层秸秆还田对土壤生物化学性质及玉米产量的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] Bowman R A, Cole C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus form in grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125(2): 95-101.
- [12] 徐秋桐, 张莉, 章明奎. 不同有机废弃物对土壤磷吸附能力及有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22): 236-244.
- [13] Smith F A, Smith S E. What is the significance of the arbuscular mycorrhizal colonisation of many economically important crop plants? [J]. Plant and Soil, 2011, 348(1): 63-79.
- [14] Lou Y L, Xu M G, Wang W, et al. Return rate of straw residue affects soil organic C sequestration by chemical fertilization[J]. Soil Tillage Research, 2011, 113(1): 70-73.
- [15] 胡宏祥, 邸云飞, 徐启荣, 等. 秸秆不同深度还田的腐解特征研究[C]// 安徽农业大学. 面向未来的土壤科学(上册)中国土壤学会第十二次全国会员代表大会暨第九届海峡两岸土壤肥科学术交流研讨会论文集. 合肥: 安徽农业大学, 2012: 380-385.
- [16] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对剖面土壤肥力质量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(3): 587-592.
- [17] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 779-789.
- [18] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. 作物杂志, 2015(2): 78-83.
- [13] Wang R, Kang Y, Wan S, et al. Influence of different amounts of irrigation water on salt leaching and cotton growth under drip irrigation in an arid and saline area [J]. Agricultural Water Management, 2012, 110(7): 109-117.
- [14] 王若水, 康跃虎, 万书勤, 等. 盐碱地滴灌对新疆杨生长及土壤盐分分布影响[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(5): 1-6.
- [15] Schelle H, Heise L, Jänicke K, et al. Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: A comparison of laboratory methods [J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(6): 814-821.
- [16] 曹红霞, 康绍忠, 武海霞. 同一质地(重壤土)土壤水分特征曲线的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2002, 30(1): 9-12.
- [17] 王治军, 雒天峰. 滴灌条件下侧柏林地根区土壤水分运动规律研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(4): 13-16.
- [18] 韦艳葵, 贾黎明, 王玲, 等. 地下滴灌条件下杨树速生丰产林林木根系生长特性[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2): 34-40.
- [19] 朱玉伟, 陈启民. 滴灌条件下七种树木根系分布特征的研究[J]. 新疆林业科技, 2008(1): 5-8.
- [20] 郝黎仁, 樊元, 郝哲欧. SPSS 实用统计分析(21 世纪高等院校计算机系列教材)[M]. 北京: 水利水电出版社, 2005.
- [21] 赵益新, 赵珂, 沈庆航. 多因素主成分分析及其在生态环境研究中的应用[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2008, 34(2): 203-206.

(上接第 242 页)